

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2003-77805

(P2003-77805A)

(43) 公開日 平成15年3月14日 (2003.3.14)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テームコード*(参考)
H 0 1 L 21/027		G 0 2 B 17/00	Z 2 H 0 8 7
G 0 2 B 17/00		G 0 3 F 7/20	5 0 3 2 H 0 9 7
G 0 3 F 7/20	5 0 3	G 2 1 K 1/06	B 5 F 0 4 6
G 2 1 K 1/06			D
			M

審査請求 未請求 請求項の数14 O L (全 14 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2001-266148(P2001-266148)

(22) 出願日 平成13年9月3日 (2001.9.3)

(71) 出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72) 発明者 村上 勝彦

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(72) 発明者 小松田 秀基

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(74) 代理人 100094846

弁理士 細江 利昭

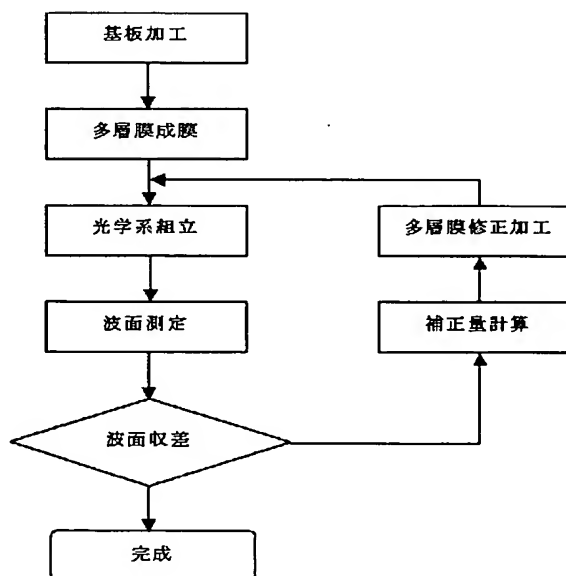
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光学系の製造方法およびEUV露光装置

(57) 【要約】

【課題】 多層膜の表面層を除去して多層膜ミラーの面形状を補正する技術を適用して、実際に光学系を製造する方法を提供する。

【解決手段】 ミラー基板を所定の形状精度、表面粗さに加工する(基板加工)。次に、これらのミラー基板に多層膜を成膜する(多層膜成膜)。次に、これらの多層膜ミラーを鏡筒に取り付けて、光学系を組み立てる(光学系組立)。次に、組み立てた光学系の波面収差を、使用する波長で測定する(波面測定)。測定した波面収差の値仕様値範囲内に入らない場合は、測定した波面から各多層膜ミラー一面形状の補正量を計算する(補正量計算)。次に、多層膜を部分的に所定の厚さだけ除去することによりミラー形状の補正を行う。その後、再び光学系の組立、波面収差測定を行う。以下、補正量計算工程、多層膜修正加工工程、光学系組立工程、波面収差測定工程のサイクルを、波面収差が仕様値を満たすまで繰り返し実施する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 光学系を構成する複数のミラー基板を所定の形状精度に加工する第一の工程と、各ミラー基板に所定の波長の光を反射する多層膜を成膜する第二の工程と、このようにして製作された各多層膜ミラーを鏡筒に固定して光学系を組み立てる第三の工程と、当該光学系の波面収差を当該光学系の使用波長で測定する第四の工程と、測定した波面収差から光学系の補正量を算出する第五の工程と、各多層膜ミラーの多層膜表面を選択的に除去して形状補正量に相当する形状の補正を行う第六の工程を含み、波面収差が所定の値以下になるまで、第五の工程、第六の工程、第三の工程および第四の工程を順次繰り返すことを特徴とする光学系の製造方法。

【請求項2】 前記第一の工程と第二の工程との間に、穴や切り欠きなどを加工する工程を挿入したことを特徴とする請求項1に記載の光学系の製造方法。

【請求項3】 前記第二の工程において、多層膜の積層数を、光学系の使用時に所定の反射率を得るために必要な層数と、形状補正で除去する層数の最大値との和よりも多くしておくことを特徴とする請求項1または請求項2に記載の光学系の製造方法。

【請求項4】 前記第四の工程において、複数の波長で波面収差を測定することを特徴とする請求項1から請求項3のうちのいずれか1項に記載の光学系の製造方法。

【請求項5】 前記第五の工程において、光学系を補正したときの光路長変化と、測定した波面の無収差波面からのズレ量との差の、分割された瞳面内における自乗和を評価関数とし、この評価関数が最小になるように最適化を行うことによって補正量を算出することを特徴とする請求項1から請求項4のうちのいずれか1項に記載の光学系の製造方法。

【請求項6】 ミラーの相互位置とミラーの形状に関するパラメータを、光学系の補正量として算出することを特徴とする請求項1から請求項5のうちのいずれか1項に記載の光学系の製造方法。

【請求項7】 ミラーの形状に関するパラメータのみを補正量として算出することを特徴とする請求項1から請求項5のうちのいずれか1項に記載の光学系の製造方法。

【請求項8】 ミラー形状に関するパラメータをゼルニケ多項式等の直交関数系で表現することを特徴とする請求項1から請求項7のうちのいずれか1項に記載の光学系の製造方法。

【請求項9】 補正量を最適化する際に、ミラー形状に関する補正量として、多層膜の一周期分を除去したときの面形状変化相当量を単位とする離散的な数値のみを採用するように制限を加えることを特徴とする請求項1から請求項8のうちのいずれか1項に記載の光学系の製造方法。

【請求項10】 前記第六の工程において、加工量の面内分布を、波長400nm以上の可視光あるいは赤外光によ

る画像により観察することを特徴とする請求項1から請求項9のうちのいずれか1項に記載の光学系の製造方法。

【請求項11】 反射面の有効領域外に座標基準マークを設けたことを特徴とする反射鏡。

【請求項12】 請求項1から請求項10のうちのいずれか1項に記載の方法により製造された光学系、または請求項11に記載の反射鏡を用いて構成されたことを特徴とする軟X線光学系。

【請求項13】 請求項12に記載の軟X線光学系を備えたことを特徴とするEUV露光装置。

【請求項14】 請求項1から請求項10のうちのいずれか1項に記載の方法により製造された光学系、または請求項11に記載の反射鏡を用いて構成されたことを特徴とするEUV露光装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、半導体デバイスなどの製造に用いられる軟X線投影露光装置およびその他の軟X線光学機器等に使用される光学系の製造方法、この製造方法によって製造された軟X線光学系、および軟X線光学系を備えたEUV露光装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術】近年、半導体集積回路素子の微細化の進展に伴い、光の回折限界によって制限される光学系の解像力を向上させるために、従来の紫外線に代わって、これより波長の短い波長11~14nm程度の軟X線を使用した投影リソグラフィ技術が開発されている。（例えば、D. Tichenor, et al., SPIE 2437 (1995) 292参照）この技術は、最近ではEUV（Extreme Ultra Violet: 極紫外線）リソグラフィとも呼ばれているが、その内容は同一である。（以下、EUVリソグラフィと呼ぶ）。EUVリソグラフィは、従来の光リソグラフィ（波長190nm程度以上）では実現不可能な、70nm以下の解像力を有する将来のリソグラフィ技術として期待されている。

【0003】この波長域では物質の屈折率が1に非常に近いので、屈折や反射を利用した従来の光学素子は使用できない。従って、屈折率が1よりも僅かに小さいことによる全反射を利用した斜入射ミラーや、界面での微弱な反射光を位相を合わせて多数重畳させて、全体として高い反射率を得る多層膜ミラーなどが使用される。13.4nm付近の波長域では、モリブデン（Mo）層とシリコン（Si）層を交互に積層したMo/Si多層膜を用いると直入射で67.5%の反射率を得ることができ、波長11.3nm付近の波長域では、Mo層とベリリウム（Be）層を交互に積層したMo/Be多層膜を用いると直入射で70.2%の反射率を得ることができる。（例えば、C. Montcalm, Proc. SPIE, Vol. 3331 (1998) P. 42参照。）

【0004】EUVリソグラフィ装置は、主として軟X線光源、照明光学系、マスクステージ、結像光学系、ウ

ェハステージ等により構成される。軟X線光源には、レーザープラズマ光源、放電プラズマ光源や放射光などが使用される。照明光学系は、反射面に斜め方向から入射した軟X線を反射させる斜入射ミラー、反射面が多層膜により形成される多層膜ミラー、および所定の波長の軟X線のみを透過させるフィルター等により構成され、フォトマスク上を所望の波長の軟X線で照明する。なお、軟X線の波長域では透明な物質は存在しないので、フォトマスクには従来の透過型のマスクではなく反射型のマスクが使用される。フォトマスク上に形成された回路パターンは、複数の多層膜ミラー等で構成された投影結像光学系により、フォトレジストが塗布されたウェハ上に結像してフォトレジストに転写される。なお、軟X線は大気吸収されて減衰するため、その光路は全て所定の真空度（例えば、 1×10^{-5} Torr以下）に維持されている。

【0005】投影結像光学系は複数の多層膜ミラーにより構成される。多層膜ミラーの反射率は100%ではないので、光量の損失を抑えるためにミラーの枚数はできるだけ少なくすることが好ましい。これまでに、4枚の多層膜ミラーからなる光学系（例えば、T. Jewell and K. Thompson, USP 5,315,629, T. Jewell, USP 5,063,586 参照）や、6枚の多層膜ミラーからなる光学系（例えば、D. Williamson, 特開平9-211332, USP 5,815,310 参照）などが報告されている。

【0006】光束が一方に進行する屈折光学系と異なり、反射光学系では光学系の中で光束が往復することになる。このため、ミラーによる光束のけられを避けるという制限が有り、開口数（NA）を大きくすることが難しい。4枚光学系ではNAを0.15程度までにしかできないが、6枚光学系では更にNAの大きい光学系の設計が可能になる。

【0007】これらの光学系においては、通常は、マスクステージとウェハステージが投影結像光学系の両側に配置できるように、ミラーの枚数は偶数になっている。このような投影結像光学系は、限られた面数で光学系の収差を補正しなければならないので、各ミラーには非球面形状が適用され、また、所定の像高の近傍でのみ収差の補正されたリングフィールド光学系になっている。フォトマスク上のパターン全体をウェハ上に転写するためには、マスクステージとウェハステージとを、光学系の倍率分だけ異なる速度でスキャンさせながら露光を行う。

【0008】上記のような露光装置の投影結像光学系は、いわゆる回折限界の光学系であり、波面収差を充分に小さくしておかないと設計通りの性能を得ることはできない。回折限界の光学系における波面収差の許容値の目安としては、Marechalによる、二乗平均値（RMS）で使用波長の $1/14$ 以内という基準がある。（M. Born and E. Wolf, Principles of Optics, 4th edition, Perg

amon Press 1970, p. 469参照）これはStrehl強度（収差のある光学系と無収差光学系との間の点像強度の最大値の比）が80%以上になるための条件である。実際の露光装置の投影結像光学系は、線幅制御性などの厳しい要求を満たすために、これよりも更に低い収差になるように製造されている。

【0009】現在盛んに研究開発が行われているEUVリソグラフィ技術においては、露光波長は主として13nmあるいは11nm付近の波長が使われている。光学系の波面収差（WFE）に対して、個々のミラーに許容される形状誤差（FE）は次式で与えられる。

$$FE = WFE / (2 * n^{1/2}) \quad [RMS] \quad \dots (1)$$

ここでnは光学系を構成するミラーの数であり、更に2で割るのは、反射光学系では入射光と反射光の両方がそれぞれ形状誤差の影響を受けるので、波面収差には形状誤差の2倍の誤差が乗るからである。結局、回折限界の光学系において、個々のミラーに許容される形状誤差（FE）は、波長 λ とミラーの枚数nの関数として次式で与えられる。

$$FE = \lambda / (28 * n^{1/2}) \quad [RMS] \quad \dots (2)$$

(2)式によれば、FEの値は、波長13nmでは、4枚のミラーで構成された光学系の場合0.23nm [RMS]となり、6枚のミラーで構成された光学系の場合0.19nm [RMS]となる。しかしながら、このような高精度の非球面形状のミラーを製造することは非常に困難であり、EUVリソグラフィがなかなか実用化できない第一の原因となっている。現在までに達成されている非球面の加工精度は0.4～0.5nm [RMS]の程度であり（C. Gwyn, Extreme Ultraviolet Lithography White Paper, EUV LLC, 1998, p17参照）、EUVリソグラフィを実現するためには非球面の加工技術および計測技術の大幅な向上が必要とされている。

【0010】最近、多層膜ミラーの表面を一層ずつ削り取ることによって、実質的にサブnmの形状誤差を補正することのできる画期的な技術が報告された（M. Yamamoto, 7th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, Berlin Germany, August 21-25, 2000, POS2-189）。その原理を、図2を用いて説明する。

【0011】図2(a)に示すようにA、B二種類の物質を一定の周期長dで交互に積層した多層膜の表面から、図2(b)に示すように一層対を除去する場合を考える。図2(a)で、多層膜表面に対して垂直方向に進行する光線に対する、厚さdの多層膜一層対の光路長OPは、 $OP = n_A * d + n_B * d$ … (3)

で与えられる。ここでdA、dBは各層の厚さを表し、 $d_A + d_B = d$ である。nA、nBは物質A、Bそれぞれの屈折率である。図2(b)で、最表面の多層膜一層対を除去した厚さdの部分の光路長OP'は、 $OP' = n * d$ … (4)で与えられる。nは真空の屈折率を表し、1である。多層膜の

最上層を除去することによって、そこを通過する光線が進む光学的距離が変化することになる。これは、実質的にその変化分だけ面形状を修正したと光学的に等価である。光路長の変化(即ち、面形状の変化) Δ は、 $\Delta = OP' - OP \dots (5)$

で与えられる。

【0012】軟X線の波長域では、物質の屈折率が1に近いので、 Δ は小さな量となり、本方法により精密な面形状の補正が可能になる。具体例として、波長13.4nmでMo/Si多層膜を用いた場合を示す。直入射で使用するために、 $d=6.8\text{nm}$ 、 $d\text{Mo}=2.3\text{nm}$ 、 $d\text{Si}=4.5\text{nm}$ とする。この波長での屈折率は、 $n\text{Mo}=0.92$ 、 $n\text{Si}=0.998$ である。これらの数値を用いて光路長の変化を計算すると、 $OP=6.6\text{nm}$ 、 $OP'=6.8\text{nm}$ 、 $\Delta=0.2\text{nm}$ となる。すなわち、厚さ6.8nmの層を除去する加工によって、0.2nm相当の面形状(反射面形状)の補正を行うことができる。

【0013】なお、Mo/Si多層膜の場合、Si層の屈折率は1に近いので、光路長の変化は主としてMo層の有無によるものであり、Si層の有無には殆ど依存しない。従って、多層膜の層を除去する際に、Si層の厚さを正確に制御する必要は無い。この例ではSi層の厚さは4.5nmあり、この層の途中で加工が停止すればよい。即ち、数nmの精度の加工を施すことによって0.2nm単位の面形状補正を行うことができる。

【0014】なお、多層膜の反射率は積層数とともに増加して一定の層数を越えると飽和して一定になる。予め反射率が飽和するのに十分な層数を積層しておけば、表面から多層膜の一部を除去しても反射率の変化は生じない。

【0015】

【発明が解決しようとする課題】この方法は非常に有効であるが、この方法を実際の光学系の製作に適用する方法は必ずしも明らかではなかった。

【0016】本発明はこのような事情に鑑みてなされたものであり、多層膜の表面層を除去して多層膜ミラーの面形状を補正する技術を適用して、実際に光学系を製造する方法及び、この方法に使用するのに適当な反射鏡、この方法によって製造された光学系を有する軟X線光学系、及びこのような軟X線光学系を有するEUV露光装置を提供することを課題とする。

【0017】

【課題を解決するための手段】前記課題を解決するための第1の手段は、光学系を構成する複数のミラー基板を所定の形状精度に加工する第一の工程と、各ミラー基板に所定の波長の光を反射する多層膜を成膜する第二の工程と、このようにして製作された各多層膜ミラーを鏡筒に固定して光学系を組み立てる第三の工程と、当該光学系の波面収差を当該光学系の使用波長で測定する第四の工程と、測定した波面収差から光学系の補正量を算出する第五の工程と、各多層膜ミラーの多層膜表面を選択的

に除去して形状補正量に相当する形状の補正を行う第六の工程を含み、波面収差が所定の値以下になるまで、第五の工程、第六の工程、第三の工程および第四の工程を順次繰り返すことを特徴とする光学系の製造方法(請求項1)である。

【0018】本手段において、第一の工程から第三の工程までは、従来行われていたのと同じ光学系の組立工程である。本手段においては、このようにして光学系の組立が完了した後、第四の工程において当該光学系の波面収差を光学系の使用波長で測定する。これは、周知の干渉計を用いて行うことができる。

【0019】そして、第五の工程において、測定した波面収差から光学系の補正量を算出する。ここで、光学系の補正量の中には、少なくとも各多層膜ミラーの表面形状の補正量が含まれる。なお、「ミラーの表面形状」とは、実際の物理的な表面形状ではなく、多層膜ミラーを単一の反射面を有するミラーと考えた場合における反射面の形状のことである。

【0020】次に、第六の工程において、図2を用いて説明した多層膜除去による多層膜ミラーの表面形状修正方法を利用して、第五の工程で得られた多層膜ミラーの表面形状の補正量が得られるように、多層膜の選択的な除去を行う。すなわち、多層膜ミラーの表面部分に応じて除去する多層膜の厚さを変えるようにして多層膜を除去する。第五の工程で得られた多層膜ミラーの表面形状の補正量に対応してどの程度の層数の多層膜を除去する必要があるかは、前記(3)式～(5)式により求めることができる。

【0021】なお、第五の工程から第六の工程に移る際には、組立てられた光学系を分解しなければならないことは言うまでもない。また、最初に行った第四の工程において、波面収差が許容値である所定の値以下である場合には、第五の工程、第六の工程が不要であることも言うまでもない。

【0022】第六の工程終了後、再び第三の工程に戻り、続いて第四の工程を行う。そして、測定された波面収差が許容値である所定の値以下となった場合には、そこで全ての工程を終了する。波面収差が所定の値以下となっていない場合には、再び第五の工程、第六の工程を経て、第三の工程、第四の工程を行う。この操作を、第四の工程で測定された波面収差が所定の値以下となるまで繰り返す。

【0023】これにより、多層膜の除去による多層膜ミラーの形状修正手法を利用して、多層膜ミラーの形状補正を行い、波面収差を確実に許容値以内とすることができる。

【0024】前記課題を解決するための第2の手段は、前記第1の手段であって、前記第一の工程と第二の工程との間に、穴や切り欠きなどを加工する工程を挿入したことを特徴とするもの(請求項2)である。

【0025】EUV光学系のような反射光学系では、反射した光線がミラーによってけられることの無いように各ミラーの外形を決める必要がある。そのために、ミラーには穴や切り欠きが設けられる場合が多い。穴や切り欠きなどの基板外形加工を先に行って、後からミラー形状精度を出す基板加工を行おうとすると、穴や切り欠きの周辺部で「縁だれ」という現象が生じて加工精度を劣化させてしまう。「縁だれ」は、外周部や穴の周辺部などの近くでは、他の部分よりも研磨速度が早くなってしまい、所望の形状精度が得られない現象である。先にミラー形状精度を出す基板加工を行って、後から穴や切り欠きなどの基板外形加工を行えば「縁だれ」は生じないが、今度は、基板外形加工による内部応力の開放によって変形が生じてしまう。

【0026】本手段においては、ミラー基板を所定の形状精度に加工する第一の工程と、各ミラー基板に所定の波長の光を反射する多層膜を成膜する第二の工程の間に、穴や切り欠きなどを加工する工程を挿入している。よって、「縁だれ」が生じることがない。また、穴や切り欠きなどを加工する工程によって生じたミラーの変形は、多層膜の除去によるミラー形状の調整によって補償されるので、ミラー形状を目的とする形状にすることができる。

【0027】前記課題を解決するための第3の手段は、前記第1の手段または第2の手段であって、前記第二の工程において、多層膜の積層数を、光学系の使用時に所定の反射率を得るために必要な層数と、形状補正で除去する層数の最大値との和よりも多くしておくことを特徴とするもの（請求項3）である。

【0028】本手段においては、成膜される多層膜の層数が、光学系の使用時に所定の反射率を得るために必要な層数と、形状補正で除去する層数の最大値との和よりも多くしてあるので、形状補正を行った後でも、光学系の使用時に所定の反射率を得るために必要な層数の補正膜が残り、よって、所定の反射率を得ることができる。光学系の使用時に所定の反射率を得るために必要な層数は、周知の計算手法により求まる。形状補正で除去する層数の最大値は、経験により求めることができる。

【0029】前記課題を解決するための第4の手段は、前記第1の手段から第3の手段のいずれかであって、前記第四の工程において、複数の波長で波面収差を測定することを特徴とするもの（請求項4）である。

【0030】このような光学系が使用される波長域は狭いのが通常であるが、ある程度の広がりを持っている。よって、使用波長域内の複数の波長で波面収差を測定することにより、使用波長域内の波長に対して波面収差の評価が可能になる。よって、後に実施の形態として例をあげるように、複数の波長に対する波面収差を評価関数として用いて、光学系の補正量を算出することができ、使用波長域内の波長のすべてを考慮した形状補正が可能

となる。

【0031】前記課題を解決するための第5の手段は、前記第1の手段から第4の手段のいずれかであって、前記第五の工程において、光学系を補正したときの光路長変化と、測定した波面の無収差波面からのズレ量との差の、分割された瞳面内における自乗和を評価関数とし、この評価関数が最小になるように最適化を行うことによって補正量を算出することを特徴とするもの（請求項5）である。

10 【0032】本手段においては、光線の通過する瞳を複数に分割し、各々の分割された領域を通過して像面の1点に結像する光線について、測定した波面の無収差波面とのずれ量を計算する。一方、これらの各々の光線について、光学系を補正した場合に得られる光路長の変化を、光学系を補正するパラメータの関数として求める。そして、測定した波面の無収差波面とのずれ量を、光学系を補正した場合に得られる光路長の変化で補償することにする。光路が複数あるので、最小自乗法を用いてパラメータを決定する。

20 【0033】すなわち、前記各々の分割された領域を通過して像面の1点に結像する光線について、光学系を補正した場合に得られる光路長の変化と、測定した波面の無収差波面とのずれ量との差を求め、この差の自乗を全ての光線について求めて、その和を取り、その和を最小とするように光学系を補正するパラメータを決定する。

【0034】これにより、瞳面のすべての場所を通る光線を考慮して、光学系の補正量を求めることができる。

30 【0035】前記課題を解決するための第6の手段は、前記第1の手段から第5の手段のいずれかであって、ミラーの相互位置とミラーの形状に関するパラメータを、光学系の補正量として算出することを特徴とするもの（請求項6）である。

【0036】本手段は、光学系の調整箇所がミラーの相互関係と、各ミラーの形状の両方であるときに有効である。すなわち、光学的系の補正量として両者が求まるので、両者を同時に調整することが可能となる。

40 【0037】前記課題を解決するための第7の手段は、前記第1の手段から第5の手段のいずれかであって、ミラーの形状に関するパラメータのみを補正量として算出することを特徴とするもの（請求項7）である。

【0038】本手段は、光学系の調整箇所が各ミラーの形状のみであるときに有効である。

【0039】前記課題を解決するための第8の手段は、前記第1の手段から第7の手段のいずれかであって、ミラー形状に関するパラメータをゼルニケ多項式等の直交関数系で表現することを特徴とするもの（請求項8）である。

50 【0040】ミラー形状に関するパラメータをゼルニケ多項式等の直交関数系で表現することは周知の方法であ

るが、前記第1の手段から第7の手段のいずれかにおいて、この手法を取り入れると、非回転対称な複雑な補正量を算出することが可能であると共に、目的とする精度に応じて多項式の次数を選択することができるので、目的に応じて最短時間でパラメータを決定する計算を完了させることができる。

【0041】前記課題を解決するための第9の手段は、前記第1の手段から第8の手段のいずれかであって、補正量を最適化する際に、ミラー形状に関する補正量として、多層膜の一周期分を除去したときの面形状変化相当量を単位とする離散的な数値のみを採用するように制限を加えることを特徴とするもの（請求項9）である。

【0042】第2図に示したような多層膜除去によるミラー形状の修正は、多層膜を一周期単位（ベアになっている層のベア単位）で除去することにより行われる。よって、操作できる補正量としては、多層膜の一周期分を除去したときの面形状変化相当量が最低の単位となる。

【0043】本手段においては、補正量を最適化する際に、ミラー形状に関する補正量として、多層膜の一周期分を除去したときの面形状変化相当量を単位とする離散的な数値のみを採用するように制限を加えているので、実際に適用できる補正量のみを解として得ることができる。

【0044】前記課題を解決するための第10の手段は、前記第1の手段から第9の手段のいずれかであって、前記第六の工程において、加工量の面内分布を、波長400nm以上の可視光あるいは赤外光による画像により観察することを特徴とするもの（請求項10）である。

【0045】前述のように、多層膜はMoとSiの組み合わせによる多層膜が使用されることが多い。MoとSiの反射率は、波長400nm以上の可視光あるいは赤外光領域においてその差が大きくなる。よって、この波長域の光を照射し、加工された画面を観察すると、MoとSiの反射率の差によって加工断面に、加工量に応じた縞模様が観察される。よって、この縞模様を観察することにより、加工量を測定することができるので、目的とする加工が行われているかどうかを確認しながら加工を行うことができる。

【0046】前記課題を解決するための第11の手段は、反射面の有効領域外に座標基準マークを設けたことを特徴とする反射鏡（請求項11）である。

【0047】本手段においては、座標基準マークを基準点として加工を行うことができるので、正確な加工が可能である。また、座標基準マークは、反射面の有効領域外に設けられるので、反射鏡の光学特性に影響を与えない。

【0048】前記課題を解決するための第12の手段は、前記第1の手段から第10の手段のいずれかで製造された光学系、または前記第11の手段である反射鏡を用いて構成されたことを特徴とする軟X線光学系（請求

項12）である。

【0049】本手段においては、用いられている光学系の波面収差を確実に許容範囲内となるように調整することができるので、精度の高い軟X線光学系とすることができる。

【0050】前記課題を解決するための第13の手段は、前記第12の手段を備えたことを特徴とするEUV露光装置（請求項13）である。

【0051】前記課題を解決するための第14の手段は、前記第1の手段から第10の手段のいずれかで製造された光学系、または前記第11の手段である反射鏡を用いて構成されたことを特徴とするEUV露光装置（請求項14）である。

【0052】これらのEUV露光装置においては、用いられている光学系の波面収差を確実に許容範囲内となるように調整することができるので、精度の高いEUV露光装置とすることができる。

【0053】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態の例を、図を用いて説明する。図1は、本発明の実施の形態である光学系の製作工程を示す図である。

【0054】まず、第一の工程として、ミラー基板を所定の形状精度、表面粗さに加工する（基板加工）。EUV露光機の投影光学系の場合は、各ミラーの形状は球面ではなく非球面であり、光学系を構成するミラーの枚数は4枚、6枚、8枚等の場合がある。

【0055】次に第二の工程として、これらのミラー基板に多層膜を成膜する（多層膜成膜）。波長13nm付近では、Mo/Si多層膜が一般に用いられる。多層膜の周期長は使用波長と光線の入射角によって決まる。光線の入射角は一枚のミラーの面内でも場所によって異なるので、どの位置でも光線を効率良く反射できるように、膜厚の分布を精密に制御して成膜を行う。

【0056】次に第三の工程として、これらの多層膜ミラーを鏡筒に取り付けて、光学系を組み立てる（光学系組立）。光学系の波面収差は、各ミラーの形状誤差だけでなく、光学系の組立調整誤差にも起因する。光学系を組み立てる方法には、大きく分けて二通りの方法がある。一つは、機械的組立精度だけで組立ててしまう方法であり、もう一つは調整機構を設けて調整を行いながら組立てる方法である。

【0057】後者の調整を行うために、He-Neレーザ等の可視光を用いた干渉計を用いて、可視光に対する波面を測定してもよい。EUV波長の波面と可視光で測定した波面は厳密には同一ではないが、その差は比較的小さいので、組立調整に利用することができる。

【0058】次に第四の工程として、組み立てた光学系の波面収差を、使用する波長で測定する（波面測定）。EUV露光機投影光学系の場合は、13nm付近のEUV光で波面の測定を行う。可視光から紫外線領域の波面計

測には、フィゾー干渉計が一般に用いられているが、レンズを使うことができないEUVの波長域では別の計測方法が必要となる。ピンホールによる回折波面との比較計測を行うPDI (Point Diffraction Interferometer, 例えば、K. Goldberg, et al., Proc. SPIE, Vol. 3997 (2000) p. 867参照) や、波面を横ずらしして重ねるシャリング干渉計 (例えば、P. Naulleau, et al., Abstract of the 44th International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication, (2000) P. 94参照) などの手法を用いることにより、EUV波長における光学系の波面を測定することができる。波面収差の測定は、露光フィールド内の一点だけではなく、露光フィールド全体の様子が分かるように、複数の点で測定する。

【0059】EUV光学系は使用波長に比べて無視できない程度の大きさのバンド幅を持っている。例えば波長13.4nm用に6枚のMo/Si多層膜ミラーで構成された投影光学系のバンド幅は0.35nmである。反射光学系は原理的に色収差を持たないが、多層膜反射による位相変化は波長によって異なるので、波面収差は、厳密には波長によって僅かに変化する。即ち、多層膜に起因する色収差が発生する。

【0060】この影響を考慮して最適化を行うためには、波面収差の測定を一つの波長だけで無く複数の波長で行うとよい。例えば、図6に示すように、投影系透過率ピーク位置波長 λ_2 の他に、その周囲の波長 λ_1 および λ_3 で波面収差を測定する。測定される波面収差は、波長によってわずかに異なっている。これらの波面収差から、各測定波長における光学系の透過率に応じた重み付けをしながら平均値を計算し、これを光学系の波面収差とする。このような手順を踏むことによって、光学系の実際の特性をより正確に表現した波面収差の値を得ることができる。測定した波面収差の値が所定の仕様値範囲内に入っていれば、これで光学系は完成である。一般には、この段階では未だ仕様値範囲内には入らないので、以下の工程を実施する。

【0061】すなわち、第五の工程として、測定した波面から各多層膜ミラー面形状の補正量を計算する(補正量計算)。補正量を求める方法は、以下の通りである。

【0062】まず、計測した波面を、計算したい精度、計算機的能力等を配慮して、適宜細かく分割する。分割の仕方は、波面全面を均等に分割してもよいし、中央のみ細分割する様な方法でもよい。分割した各エリア中央個所の、無収差波面からのずれ量を、 $f_1 \sim f_n$ とする。次に、元となった光学系の設計解に対して、瞳を、波面を分割した時と同一形状に分割し、それぞれの分割個所中央を通過する光線の、物体から像に至る光路長を計算する。この時のそれぞれの光路長を、 $g_1 \sim g_n$ とする。

【0063】ミラーの間隔、傾き、偏心を変更したり、

曲率半径や非球面計数、あるいはZernike計数などで表現されたミラーの形状を変更することによって、 $g_1 \sim g_n$ は、 $g'_1 \sim g'_n$ へと変化する。ここで、評価関数 Φ を以下のように設定する。

【0064】

【数1】

$$\Phi = \sum_{i=1}^n w_i (g'_i - g_i - f_i + k)^2 \quad \dots (6)$$

【0065】ここで、 $w_1 \sim w_n$ は、各光路に対する計算時の重み付けであり、全て1でも構わないが、瞳中心付近の光線を重視し、周辺の光線を軽視したいとき等においては、要求に応じて適当に選定する。また、 k は、常に Φ が最小となるよう選ばれる実数であり、(6)式においては未知数の一つである。

【0066】(6)式において、この k を無視すれば、波面の無収差波面からのずれ量 f_i に対応する値だけ、光路長を g_i から g'_i に変化させたとき、左辺の括弧の中がゼロとなる。すべての i に対してこのようなことができれば、全ての光線に対して波面収差を0とすることができる。しかし、実際には、このようなことができないので、最小自乗法により、(6)式の Φ が最小となるように g'_i と k を決定する。

【0067】すなわち、ミラーの相互位置(間隔、傾き、偏心)とミラーの形状(曲率半径、非球面計数、Zernike計数等)をパラメータとして、最適化問題を解くことによって、この評価関数 Φ が最小となるようなパラメータの組みを計算によって求め、設計値と最適化されたパラメータの差分を求めれば、それが補正量となる。このようにして計算した補正量には、一般に、ミラーの形状に関するパラメータの補正量だけでなく、ミラーの相互位置に関するパラメータも含まれている。

【0068】多層膜を修正加工した後、再度鏡筒にミラーを組み込んで光学系を組み立てる際に、何らかの調整機構によりミラーの位置の再調整を行う場合には、上記の計算から得られたミラーの相互位置に関するパラメータの補正量に従って調整を行えばよい。ミラー位置の再調整を行わない鏡筒機構の場合には、ミラーの相互位置に関するパラメータは固定値とし、ミラーの形状に関するパラメータだけを变化させて評価関数を最小にする最適化を行えばよい。

【0069】ミラー形状に関するパラメータについては、曲率半径や非球面計数だけでは回転対称な成分しか補正することができないが、Zernike多項式などの直交関数系に展開して面形状を表現することによって、非回転対称な複雑な補正量を算出することが可能である。

【0070】以上の説明は、簡単にするために、光学系のフィールド内の一点のみについて最適化する場合について述べた。実際には、フィールド内の複数の像点位置で波面収差を測定し、全ての位置で波面収差が小さくな

るように最適化する。具体的には、分割された瞳面の和と、フィールド内で選択された複数の像点の和によって、次のように評価関数Φを設定すればよい。

【0071】

【数2】

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_i (g'_{ij} - g_{ij} - f_{ij} + k_j)^2 \quad \dots (7)$$

【0072】(7)式において、 g_{ij} は、像点jに結像する光線のうち分割された瞳のi区分を通る光線の光路長で計算値、 g'_{ij} は、ミラーの間隔、傾き、偏心を変更したり、曲率半径や非球面計数、ミラーの形状を変更することによって変化した新しい光路長で未知数、 f_{ij} は、像点jに結像する光線のうち分割された瞳のi区分を通る光線の無収差波面からのずれ量で実測値、 w_i は各光路に対する計算時の重み付け、 k_j は、常にΦが最小となるよう選ばれる実数であり、(7)式においては未知数の一つである。

【0073】(6)、(7)式における評価関数Φを最小化するパラメータを求める計算手法には、一般にレンズ設計時の最適化アルゴリズムに使用されている方法を使用することができる。例えば、DLS法(Damped Least Squares、減衰最小二乗法)などを用いればよい。あるいは、Simulated AnnealingやGenetic Algorithm(遺伝的アルゴリズム)などの最近の最適化計算の手法を用いてもよい。

【0074】一般の最適化アルゴリズムでは、パラメータを連続的に変化させながら評価関数を最小にするパラメータの組を探索する。しかしながら、多層膜を除去して反射面形状を補正する際には多層膜を一層ずつ除去していくので、実際に実行できる補正量は連続的ではなく離散的である。通常の最適化計算を行い、その近似値を用いて面形状の補正を行っても、誤差が累積して十分な精度にまで波面収差を低減できない恐れがある。そこで、パラメータの最適化計算を行う際に、ミラー形状に関するパラメータについては、予め離散的な値しか取れないという制限を与えてパラメータの最適化を行うことが好ましい。

【0075】以上に説明した補正量の計算手法は、パラメータの変化に対して波面収差の変化が線形であるという近似が成り立つ程度に、補正を行う前の光学系の波面収差が小さいことが前提となっている。この前提が成り立つ範囲は計算によって見積もることができるので、それに基づいて予め必要なミラー基板の加工精度と鏡筒の組立精度の仕様値を決めておけばよい。

【0076】次に第六の工程として、多層膜を部分的に所定の厚さだけ除去することによりミラー形状の補正を行う。前述のように、実効的な反射面形状の補正量よりも、実際に多層膜を除去する量は一桁以上大きいので、精密な面形状補正が可能である。

【0077】多層膜を部分的に除去する方法としては、スモールツール修正研磨法、イオンビーム加工法、CVM(Chemical Vapor Machining)法等を用いることができ、その一つの方法が、本発明者らによって発明され、特願2000-321031号として特許出願されている。

【0078】Zernike多項式などによって表現された、非回転対称な複雑な形状を加工しようとするときには、ミラー面のどの場所を加工するのか基準となる座標系を正確に決めておく必要がある。そのために、各ミラーの有効領域外のミラー面内に座標の基準となるマークを設けておく。この基準マークは光学系の組立調整を行う際に、各ミラーの偏心、方位角、傾き等を再現するための基準として利用することもできる。

【0079】多層膜を部分的に所定の厚さだけ除去するためには、加工の途中に、所定の形状に向けて正しく加工作業が進行しているか確認を繰り返し行う必要がある。干渉計で面形状を測定したり、機械的あるいは光学的段差計で加工した部分の深さを測定したりしてもよいが、最も簡便な方法は、多層膜の周期構造自体を等高線として利用する方法である。多層膜の表面を部分的に削り取っていくと、多層膜を構成する二種類の物質の、色の違いからなる等高線が見えてくる。これを目視、あるいは撮像して画像処理を行うことによって、部分的除去加工にフィードバックをかけることができる。

【0080】図7にMoとSiの分光表面反射率を示す。この図から明らかなように、波長400nm以上の可視光あるいは赤外光を用いて観察すると、表面にMoが現れた部分とSiが現れた部分の反射率が異なるため、前記の等高線を観察することができる。波長が長くなるほど反射率の差は大きくなるので、撮像・画像処理を行う際には、例えば波長1000nm～1500nm程度の、赤外光を用いることが好ましい。

【0081】第六の工程を終了した後、再び第三の工程へ戻り光学系の組立を行い、第四の工程である波面収差測定を行う。ここで測定された波面収差が仕様値範囲内であれば、光学系は完成である。仕様値を満たさない場合は、再度第五の補正量計算工程、第六の多層膜修正加工工程、第三の光学系組立工程、第四の波面収差測定工程のサイクルを、波面収差が仕様値を満たすまで繰り返し実施する。

【0082】EUV光学系のような反射光学系では、反射した光線がミラーによってけられることの無いように各ミラーの外形を決める必要がある。そのために、ミラーには穴や切り欠きが設けられる場合が多い。穴や切り欠きなどの基板外形加工を先に行って、後からミラー形状精度を出す基板加工を行おうとすると、穴や切り欠きの周辺部で「縁だれ」という現象が生じて加工精度を劣化させてしまう。「縁だれ」は、外周部や穴の周辺部などの近くでは、他の部分よりも研磨速度が早くなってし

まい、所望の形状精度が得られない現象である。先にミラー形状精度を出す基板加工を行って、後から穴や切り欠きなどの基板外形加工を行えば「縁だれ」は生じないが、今度は、基板外形加工による内部応力の開放によって変形が生じてしまう。

【0083】このような問題点を解決するためのは、図3に示すような工程で光学系を製作すればよい。図3に示す工程は、図1に示した工程と良く似ているが、基板加工工程と多層膜成膜工程の間に基板外形加工工程が挿入されている点だけが異なる。ここで基板の穴あけや切り欠き形成の加工を行う。基板外形加工によって変形が生じ、ミラーの形状精度は劣化してしまうが、続けて多層膜成膜工程、光学系組立工程、波面測定工程を行う。測定された波面収差には、基板外形加工による変形によって生じた形状誤差に起因する成分が含まれている。この後は図1の工程と同様の工程を進めていく。補正量計算工程と多層膜修正加工工程を通過することによって、基板外形加工により生じた変形は、自動的に補正されてしまうので、光学系の最終性能に悪影響を及ぼすことはない。

【0084】

【実施例】以下、本発明をEUV露光装置の投影光学系に適用した実施例について説明する。

（実施例1）投影光学系は、図4に示すように、4枚の非球面ミラーから構成されており、開口数（NA）が0.

1、倍率が1/4で、リングフィールド状の露光領域を有している。物面から放出された光束は、ミラーM1、M2、M3、M4で順次反射され、像面に結像する。図5に、この光学系を構成する各ミラー（M1～M4）の外形を示す。M1、M3およびM4には、光束を通すための開口11が設けられている。M2には、光束のケラレを防ぐための切り欠き12が設けられている。斜線部は、各ミラーの有効領域13を示す。有効領域の外側に、座標基準となるマーク14が設けられる。

【0085】まず、従来の研磨加工技術によって各非球面ミラーを製作した。各ミラーの形状精度は、約0.5nm [RMS]であった。各ミラーには、粗加工の段階で、予め座標基準マーク14を彫刻しておいた。

【0086】その後、M1、M3およびM4の穴あけと、M2の切り欠きを形成する基板外形加工を行った。これらの加工を施した後に各ミラーの形状を測定してみたところ、加工精度は0.7～0.9nm [RMS]に劣化していた。これは、ミラーの一部を除去したことにより、内部応力の開放が起こり変形したものである。なお、本実施例では基板外形加工の後に形状測定を行ったが、通常は、この段階で形状測定を行う必要は無い。

【0087】次に、各ミラーの反射面に、使用波長13.4nmに対して最適化されたMo/Si多層膜を形成した。多層膜の周期長は6.8～7.3nmの範囲にありミラー面各位置での光線の入射角に合わせて最適化されている、多層膜の

積層数は70層とした。これらの多層膜は、イオンビームスパッタリングにより膜厚分布の制御を行いながら成膜した。

【0088】次に、これらの多層膜ミラーを鏡筒内に固定して、光学系を組み立てた。光学系の組立は機械的精度のみによって行い、調整等は行わなかった。光学系を組み立てる際に、各ミラーの方位角が常に同じ方向になるように、座標基準マーク14を基準として用いた。なお、この鏡筒は、ミラーを再現性良く着脱可能な構造に設計されている。

【0089】次に、光学系の波長13.4nmにおける波面収差を測定した。測定には、レーザープラズマ光源を用いたシャリング干渉計を使用した。波面収差の測定は、円弧状のフィールド内の15点で行った。測定した波面収差の値は、1.9nm [RMS]から2.5nm [RMS]の範囲であった。

【0090】次に、測定された波面収差と光学設計解から、「発明の実施の形態」で説明した方法により各ミラーの補正量を計算した。各ミラーの形状を表す36項のZemike多項式をパラメータとして最適化を行った。本実施例では鏡筒の調整機構は持たないので、ミラーの相互位置を表すパラメータは、最適化計算のパラメータには使用しなかった。

【0091】次に、鏡筒から各ミラーを取り外して、算出した補正量に従って、形状の修正加工を行った。加工にはスモールツール研磨装置を用いた。CCDカメラでミラー表面の可視光による画像を取得し、加工によって表面に現れたMo部とSi部を観察して、加工の進行状況をモニターした。このとき、面内の座標基準として、座標基準マーク14を利用した。

【0092】次に、各ミラーを再び鏡筒に組み込んで光学系を組み立てて、波長13.4nmでの波面収差を測定した。その後、各ミラーの修正加工と光学系の波面計測を何度か繰り返し、最終的に、光学系の波面収差を、フィールド内の全ての点で0.5nmRMS以下にすることができた。

【0093】このようにして製作した投影光学系を、図8に示すような、EUV露光装置に組み込んで露光テストを行った。図中、IR1～IR4は照明光学系の反射鏡であり、PR1～PR4は投影光学系の反射鏡である。Wはウェハ、Mはマスクである。

【0094】レーザー光源から照射されたレーザー光は、ターゲットSに集光され、プラズマ現象により、ターゲットSから軟X線を発生させる。この軟X線は、反射鏡C、Dにより反射され、平行な軟X線として照明光学系に入射する。そして、照明光学系の反射鏡IR1～IR4により順次反射され、マスクMの照明領域を照明する。マスクMに形成されたパターンによって反射された軟X線は、投影光学系の反射鏡PR1～PR4によって順次反射され、パターンの像をウェハW面に結像する。本EUV露光装置では、50nmL&S（ラインアンドスペース）の微細

なパターンまで解像することができた。

【0095】（実施例2）本発明をEUV露光装置の投影光学系に適用した実施例について説明する。投影光学系は6枚の非球面ミラーから構成されており、開口数（NA）が0.25、倍率が1/4で、リングフィールド状の露光領域を有している。

【0096】まず、従来の研磨加工技術によって各非球面ミラーを製作した。各ミラーの形状精度は、約0.5nm [RMS]であった。その後、M1、M3、およびM4の穴あけと、M2の切り欠きを形成する基板外形加工を行った。

【0097】次に、各ミラーの反射面に、使用波長13.4nmに最適化されたMo/Si多層膜を形成した。多層膜の周期長は6.8〜7.5nmの範囲にありミラー面各位置での光線の入射角に合わせて最適化されている、多層膜の積層数は70層とした。これらの多層膜は、イオンビームスパッタリングにより膜厚分布の制御を行いながら成膜した。成膜時には、基板上にマスクをして有効領域のみに多層膜を形成した。このときマスクに適当な開口パターンを設けておき、有効領域の外側に、多層膜でできた座標基準となるマークを設けた。

【0098】次に、これらの多層膜ミラーを鏡筒内に固定して、光学系を組み立てた。この鏡筒には調整機構が設けられており、ミラー間隔、ミラーの偏心、傾き等を微調整することができる。マイクロメータヘッドにより、各調整量をどれだけ動かしたか正確に読みとれるような機構が設けられている。He-Neレーザーを光源とするフィゾー干渉計を用いて、可視光による波面を見ながら光学系の組立調整を行った。光学系を組み立てる際に、各ミラーの方位角が常に同じ方向になるように、座標基準マークを基準として用いた。座標基準マークは、方位角だけでなく、ミラーの偏心や傾きの測定に用いてもよい。なお、この鏡筒は、ミラーを再現性良く着脱可能な構造に設計されている。

【0099】次に、光学系の波長13.4nmにおける波面収差を測定した。測定には、放射光のアンジュレータ光源を用いたPDI（Point Diffraction Interferometry）干渉計を使用した。波面収差の測定は、円弧状のフィールド内の15点で行った。各測定点において、13.2nm、13.4nm、13.6nmの三つの波長で波面測定を行い、各波長での光学系の透過率で重み付けして平均値を取り、その位置での波面収差とした。測定した波面収差の値は、1.7nm [RMS]から2.4nm [RMS]の範囲であった。

【0100】次に、測定された波面収差と光学設計解から、「発明の実施の形態」で説明した方法により各ミラーの補正量を計算した。各ミラーの形状を表す81項のZemike多項式をパラメータとして最適化を行った。最適化計算のパラメータには、各ミラーの形状を表現するZemike多項式の係数の他に、ミラーの相互位置を表すミラー間隔、偏心、傾きもパラメータとして用いた。

【0101】次に、鏡筒から各ミラーを取り外して、算出した補正量に従って、形状の修正加工を行った。加工にはスモールツール研磨装置を用いた。CCDカメラでミラー表面の可視光による画像を取得し、加工によって表面に現れたMo部とSi部を観察して、加工の進行状況をモニターした。このとき、面内の座標基準として、座標基準マークを利用した。

【0102】次に、各ミラーを再び鏡筒に組み込んで光学系を組み立てて、波長13.4nmでの波面収差を測定した。その後、各ミラーの修正加工と光学系の波面計測を何度か繰り返し、最終的に、光学系の波面収差を、フィールド内の全ての点で0.4nm [RMS]以下にすることができた。

【0103】このようにして製作した投影光学系を、EUV露光装置に組み込んで露光テストを行ったところ、30nmL&Sの微細なパターンまで解像することができた。

【0104】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、多層膜の表面を所定の量だけ除去して反射波面形状を補正する方法を、EUV光学系の製作に有効に適用することが可能になるので、光学系の波面収差を低減して欠像特性を向上することができる。また、従来の多層膜による波面補正を用いない光学系の製造方法と比較して、最初の非球面加工に要求される精度が大幅に緩和されるので、光学系の製造に要する期間の短縮、製造コストの低減が可能になる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施の形態である光学系の製造工程を示す図である。

【図2】多層膜の表面除去による反射波面位相補正の原理を説明する図である。

【図3】本発明の他の実施の形態である光学系の製造工程を示す図である。

【図4】本発明の第一の実施例である4枚非球面投影光学系の構成を示す図である。

【図5】第一の実施例である4枚非球面投影光学系を構成する各ミラーの形状を示す図である。

【図6】複数の波長で波面収差を測定する方法を説明する図である。

【図7】MoおよびSiの分光表面反射率を示す図である。

【図8】本発明を適用するのに好適な軟X線光学系およびEUV露光装置の構成を示す図である。

【符号の説明】

11…開口
12…切り欠き
13…有効領域
14…座標基準マーク
M1〜M4…ミラー（多層膜ミラー）
L…レーザ光源
S…ターゲット

C…反射鏡

D…反射鏡

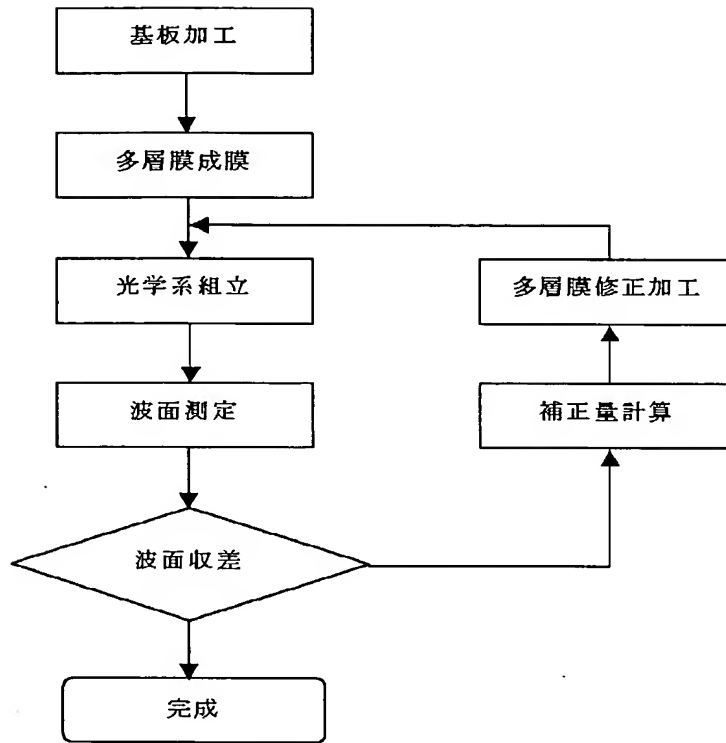
IR1~IR4…照明光学系の反射鏡

* PR1~PR4…投影光学系の反射鏡

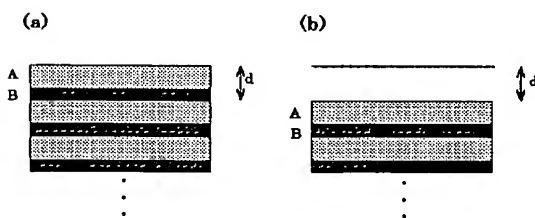
M…マスク

* W…ウェハ

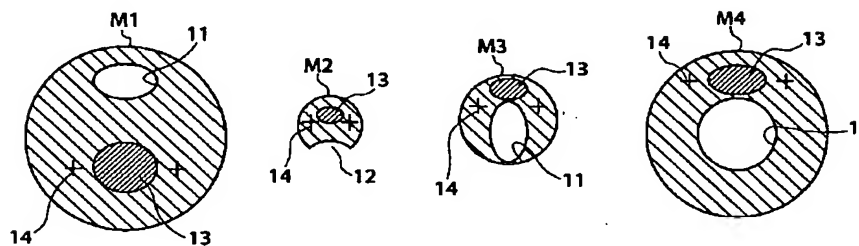
【図1】



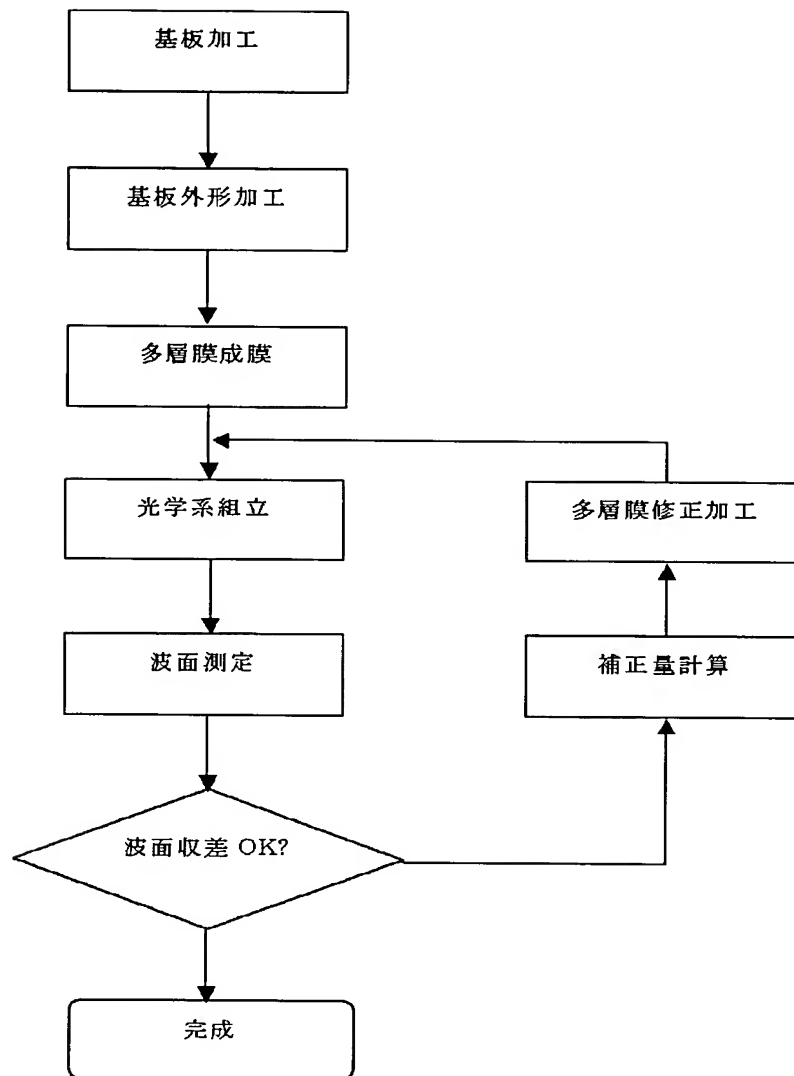
【図2】



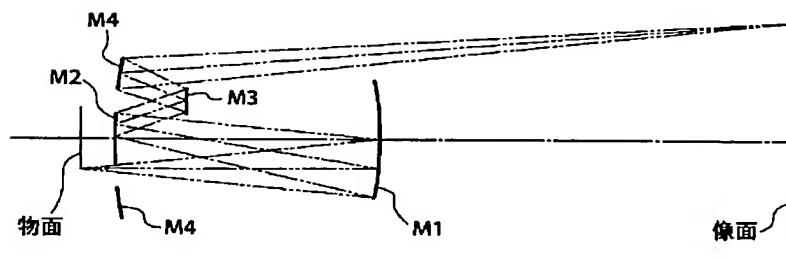
【図5】



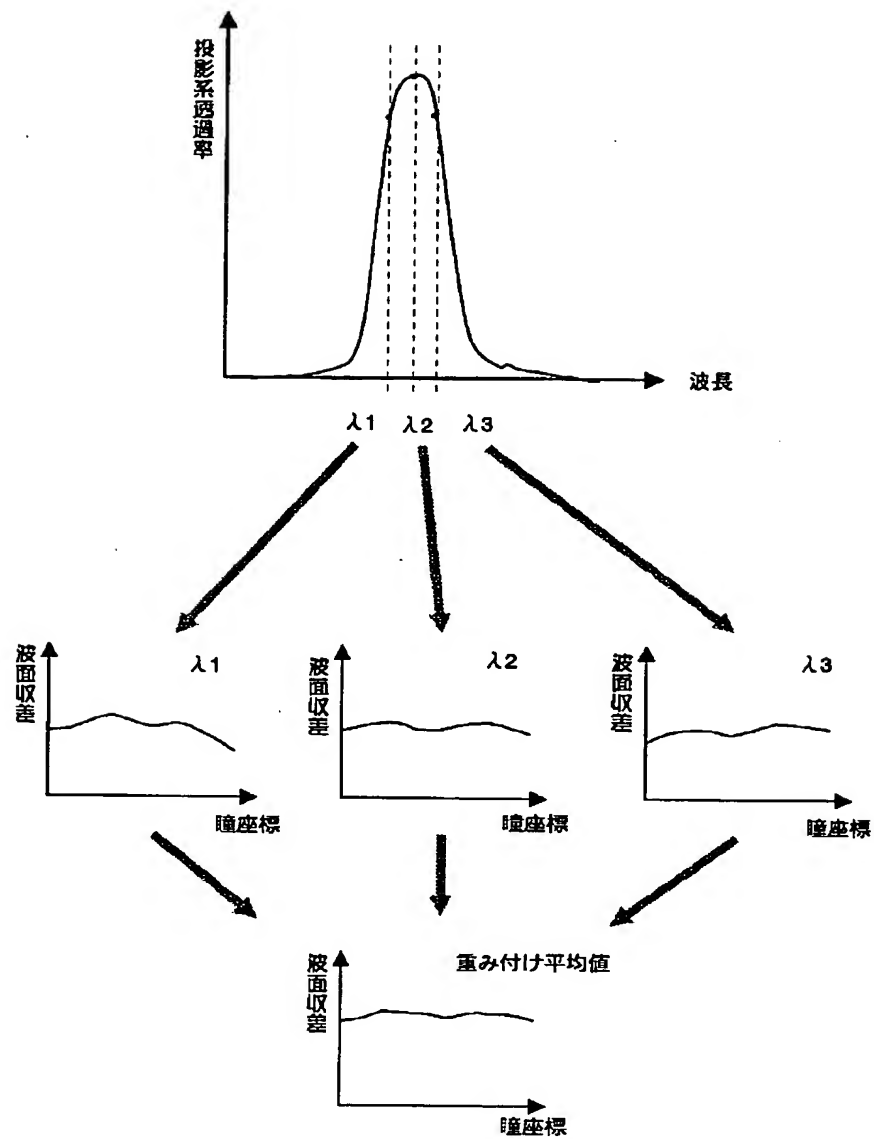
【図 3】



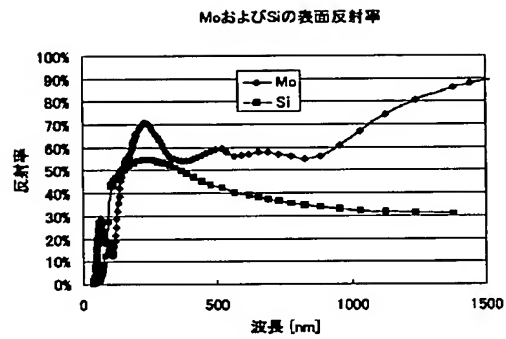
【図 4】



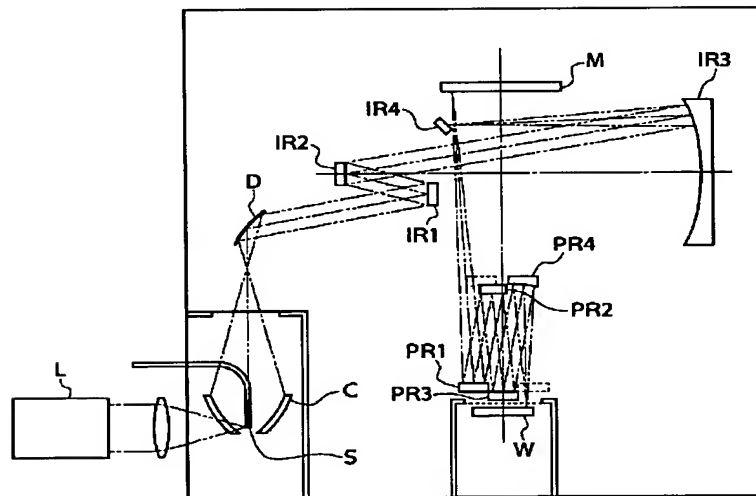
【図6】



【図7】



【図8】



フロントページの続き

(51)Int.Cl.

G 2 1 K 1/06

識別記号

F I

H 0 1 L 21/30

テーマコード(参考)

5 3 1 A

5 1 7

(72)発明者 山本 正樹

宮城県仙台市青葉区片平2-1-1 東北

大学工学部科学計測研究所内

Fターム(参考) 2H087 KA21 NA05 NA09 TA02 TA06

2H097 CA15 GB00 LA10

5F046 BA05 CB03 CB23 CB25 DA11

GA03 GA14 GB01